

結晶格子を基準とした測長

—100ナノメートルオーダでの比較測長の精度の測定—

Comparison Measurement with a Crystalline Lattice as the Scale Reference

—Measurement of Accuracy for a Measurement Range of 100nm—

川 勝 英 樹*・樋 口 俊 郎**・鴻 上 弘*

Hideki KAWAKATSU, Toshiro HIGUCHI and Hiroshi KOUGAMI

1. 諸 言

近年、半導体の高集積化やマイクロマシニング技術の著しい進歩により、その扱う対象はサブミクロンオーダの領域に入りつつある。われわれは、これらの微細加工物等の寸法を精密に測定するための方法として、結晶格子の規則性を測長のスケールとして用いることを提案している。

走査型トンネル顕微鏡 (STM)¹⁾ で得られる結晶像を測長の基準として利用するために、2 個の STM 探針を有し、測長対象となる試料と測長の基準となる結晶の同時観察が可能なデュアルトンネリングユニット STM (DTU-STM)^{2)~4)} を用いている。

これまで、DTU-STM を用いてグラフィイトを 10nm オーダの範囲で観察し、試料の傾き、および探針の熱ドリフトによる歪みを補正することで 2 像の一致度が向上することを確認している⁴⁾。

本報では、比較測長の精度を向上させ、より実用的な走査範囲での測長を実現するために、一方のトンネリングユニットで 100nm を超える範囲での実験を行った結果を報告する。走査方向に約 150nm の範囲にわたってグラフィイト結晶を観察し、広走査範囲の実現により精度評価における格子点位置の読み取り誤差が減少すること、走査方向に関しては熱ドリフトによる影響をほとんど受けないことを確認した。また、結晶像からの格子点の自動抽出を行い、格子間隔を基準として圧電素子のヒステリシスループを求めることが可能になった。

STM, AFM 等によって得られる像の規則性、周期性を像補正や測長に用いた研究としては、他に数件の研究が挙げられる^{5)~7)}。

*東京大学生産技術研究所 第2部

**東京大学工学部

2. 実験方法

2.1 同一試料の連続走査

結晶格子をスケールに用いて比較測長を行う際の誤差要因としては、以下の事が挙げられる。

- ・STM 探針の熱ドリフトによる像の歪み。
- ・試料表面の傾きによって生じる像の歪み。
- ・XY スキャナが直交していないために生じる干渉による像の歪み。

これらの像の歪みが、スケールとなる結晶像と未知試料像で異なることが、2 像を比較する際の問題点となる。スキャナの非線形性、および X, Y 各スキャナの感度差による像の歪みは、同一の XY ステージを用いているため、2 像に対して等しく生じる。

本実験では、比較測長を行う際の熱ドリフトの影響を調べる。熱ドリフト以外の影響を除くため、DTU-STM の STM 探針 1 個を用いてグラフィイト結晶⁸⁾ を観察し、ある時間をおいて再び、同一の STM 探針で同一の結晶を観察する。このような条件では、次のような仮定が行える。

- ・XY スキャナの感度特性などの装置の安定性が保たれる。
- ・試料表面の傾きやスキャナの干渉による歪みは 2 像に等しく生じる。
- ・2 像の走査を行う間に、熱ドリフト量が変化し、異なる歪みが生じる可能性がある。

こうして得られた 2 個の結晶像の一致度を比較することによって、他の誤差要因の影響を受けない、熱ドリフトのみによる影響を評価できる。

2.2 結晶格子を基準とした長さの算出

得られた一組の像の一致度を比較するために、結晶像上における 2 点間の長さを結晶格子点の数から算出する。結晶格子の峰に沿った辺の長さは、その格子数を数えることでわかる。結晶像上の任意の 2 点間の長さは、方位の異なる

研究速報

る2辺の結晶格子数, および2辺間の角度から余弦定理によって計算される。

結晶像からの格子点の数の読み取りは, これまでは手作業で行ってきたが, 広走査範囲において, 大量のデータを統計的に解析するためには, 格子点の抽出, および見かけの長さの算出を計算機によって自動化する必要がある。図1に格子点抽出の手順を示す。

- (1) 1つの格子点の位置, および隣接する2個の格子点の, 方位の異なる2個のベクトル a , b を初期値として与える。
- (2) この出発点から隣の格子点までのベクトル a を加える。その位置を中心とした半径が格子間隔の1/2程度以内において重心を求め, 新しい格子点とする。
- (3) この格子点の位置を用いて, 再び隣の格子点を求める。ある峰の終わりまできたら, ベクトル b で隣の峰へ移る。

この動作を順次行うことで, 方位の異なる2つの峰に沿った格子点を抽出できる。ベクトル a , b を抽出の過程で随時修正していくことで, より抽出の確度を向上できると考えられる。こうして得られた格子点列の座標データによって, 結晶像上の任意の点は, 画素数による直交座標系から結晶格子のある2つの峰にそった座標系に変換される。

3. 実験結果

本報では, 得られた結晶像に一部数nm四方程度の範囲で格子の見にくい部分があり, 結晶像の全範囲では格子点抽出を行っていない。そこで, 3.1節では格子点を手作業によって抽出し150nmでの2像の一致度を比較する。3.2

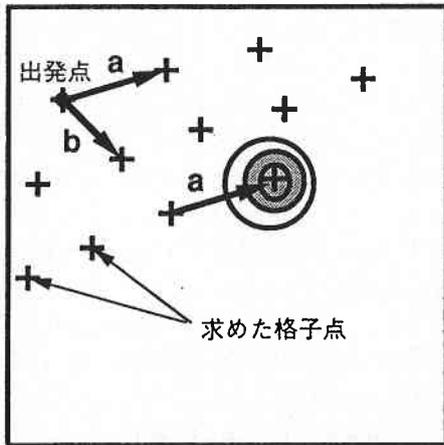


図1 結晶格子の自動抽出の手順
既知のベクトル a , b を用いて, 順次新しい格子点を求める。探索する円内においてある閾値によりマスクをかけ, この領域の重心を新しい格子点とする。

節では, 2像ともに格子点抽出の自動化ができた50nmの範囲での比較を行い, また, 120nmの範囲で抽出された格子点から, スキャナの非線形性を測定する。

3.1 走査範囲150nmでの2像の比較

図2に, 同一のグラファイト結晶を続けて走査することによって得られた2個の結晶像を示す。走査範囲は $5 \times 150\text{nm}$ であり, 走査方向に長い。1ラインあたりの走査時間は380ms, 1つの像を走査するのに要する時間は約4分である。(a)の像を走査してから約30分後に, 再び走査し(b)の像を得た。

また, これらの像取得の前後において, 熱ドリフト測定のためXおよびY方向への1軸のみの走査を行い, 結晶の周期的な特徴が流れて行くようすを観察した。

この2像の走査方向における一致度を比較するために, 結晶格子の格子点の数から計算される見かけの長さを走査方向と平行な直線上において測定した。結果を表1に示す。図2の2像のそれぞれの線分は, 互いに同一の場所に描かれており, 格子数による見かけの長さをそれぞれ求めた後,

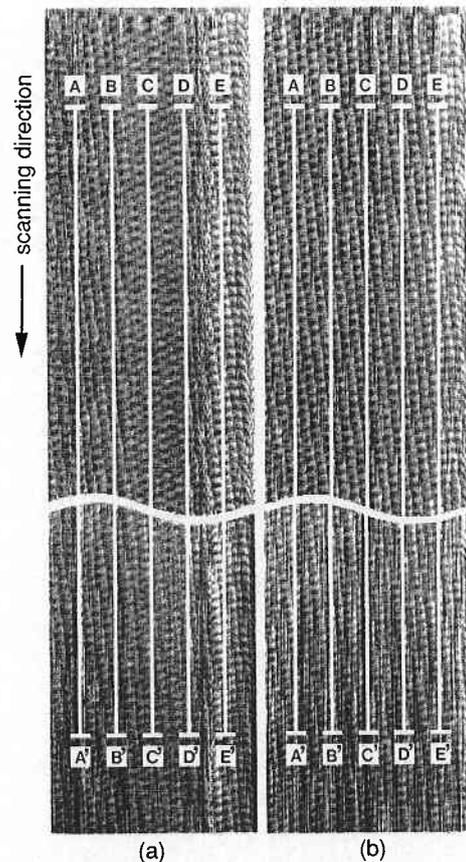


図2 同一試料を続けて走査して得られた黒鉛の結晶像。走査範囲は約 $5 \times 150\text{nm}$ 。(a)と(b)の時間差は約30分。

表 1 走査方向に沿った直線の、結晶格子による見かけの長さの比較. 図 2(a) 像の直線の長さを基準として, (b) 像との一致度を % で表す. 比較範囲は約 150nm. 結晶像の読み取りは手作業による.

	A-A'	B-B'	C-C'	D-D'	E-E'
一致度 (%)	99.946	99.972	100.00	99.985	99.993
平均	99.983 $\begin{matrix} +0.017 \\ -0.037 \end{matrix}$				

一方を基準にして他方の長さの割合をパーセントで表した.

この比較では, 格子点の抽出および格子中の位置の読み取りは手作業によって行っている. 読み取り誤差は測長範囲が大きくなるほどその影響が相対的に小さくなり, 精度の高い評価が可能になる. 読み取り誤差として格子間隔の 10% が生じるとすると, 格子間隔を約 0.25nm として約 0.025nm となる. 150nm の測長範囲全体に対する読み取り誤差のみを考慮すればよく, 両端における誤差を考慮すると, $0.025 \text{ (nm)} \times 2 \div 150 \text{ (nm)} \times 100 = 0.033\%$ となる. この結果から, 図 1 の一組の像の走査方向への見かけの長さは, 考えられる読み取り誤差の範囲内ではほぼ一致しており, 熱ドリフトの変化による像の歪みの影響をほとんど受けていないと考えられる.

図 2 の 2 像の走査前後に測定した 1 軸走査によるドリフト像から読みとられるドリフト量の変化は 0.0035nm/s, 走査方向 1 ラインあたりでは 0.0013nm である. このドリフト量の変化による誤差は 0.001% と小さい. すなわち, 走査方向への見かけの長さを比較測長する場合は, その長さ方向への時間経過が短いため熱ドリフトによる影響はほとんど受けないことがわかる. しかし, 走査方向と垂直な送り方向への見かけの長さの比較を行う場合は長さ方向への時間経過が 240s と長く, その間のドリフト量の変化は 0.84nm, 結晶格子 3 個分相当にまでなる. この結果, 熱ドリフトによる誤差は, 5 nm に対して 18.6% と非常に大きくなる. したがって, 送り方向に関して正確な比較測長を行うためには, 正確なドリフト量の測定とその補正が必要になる.

3.2 見かけの長さの自動算出による比較

より多くのデータを処理するために, 図 2 の 2 個の結晶像について, 計算機による格子点抽出および見かけの長さの算出を行った. 格子点抽出の例として, 図 3(a) に, 図 2(b) と同時の走査における帰り方向の走査によって得られた結晶像の生像を, 図 3(b) にその 2 次元 FFT によるフィルタ像を示す. 走査方向に約 150nm の範囲における結晶像の両端の一部分のみを示す. 図中の格子点の位置は (a), (b) とともに (b) のフィルタ像から求めたものである. 結

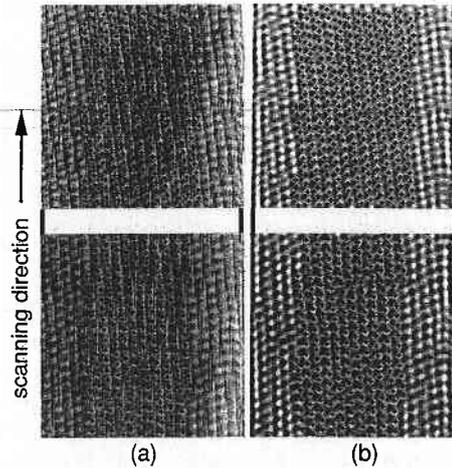


図 3 格子点の自動抽出の結果. (a) は, 図 2(b) の帰り方向の走査による結晶像, (b) はそのフィルタ像である. 走査範囲約 $5 \times 150\text{nm}$ のうち両端の 5 nm 四方のみを示す. 図中の・が抽出された格子点.

表 2 格子点の自動抽出による, 直線の見かけの長さの比較. 図 2 の 2 像において, スキャン方向に沿った約 50nm の直線の長さを測定した. 見かけの長さを格子数で表す. 200 格子は約 50nm に相当する.

	A - A'	B - B'	C - C'	D - D'	E - E'
(a) 像	197.336	197.319	197.167	197.196	197.314
(b) 像	197.283	197.200	197.535	197.195	197.370
(a) 像 - (b) 像	0.053	0.119	-0.368	0.001	-0.056
平均 (格子数)	-0.050 $\begin{matrix} +0.169 \\ -0.318 \end{matrix}$				

晶像を測長のスケールとして用いる場合, 平面として見た構造が歪まないならば, 2 次元フィルタリングは結晶の周期性を明確にする有効な手段となる.

図 2(a)(b) の 2 像に対して同様にフィルタ処理を行い, 計算機によって算出した見かけの長さを比較した. 表 2 に, 2 像ともに格子点を自動抽出できた 50nm の範囲で 2 像を比較した結果を示す. 3.1 節と同様に, 走査方向に平行な 5 本の線分について, それぞれのフィルタ像の結晶格子から算出される長さの差を求めた. その結果, 2 像の長さの差は平均で 0.05 格子間隔, 測定結果のばらつきが 0.5 格子間隔程度生じている. これは, 格子点の抽出がノイズにより不正確になるためと考えられる. これを避けるためには, 格子点の並びを最小二乗法等で近似し, その曲線の交点を再び求めることで格子点を抽出し直すという方法が考えられる. スキャナの非線形性による歪みも修正してしまわないように, この近似は局所的に行う必要がある.

図 3 において, 走査方向での両端の 2 像を比較すると,

研究速報

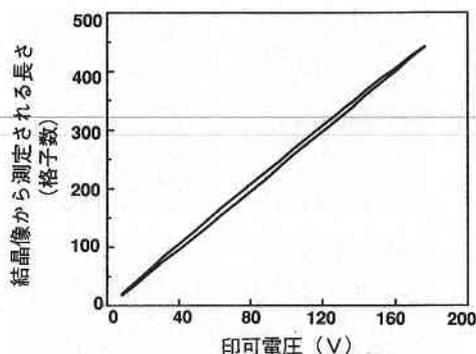


図4 結晶像から測定された圧電素子のヒステリシス特性。
下側の曲線は図2(a)の像, 上側の曲線はその時の帰り像から求めた。横軸は圧電素子への印可電圧。縦軸は圧電素子の変位量として, 結晶像から得られる長さを格子数で示す。

走査方向に含まれる格子点の数が上側の図は約21個, 下側の図は約19個と異なる。これは圧電素子の非線形性の影響によると考えられる。そこで, 図2(a)の走査の際の行きおよび帰りのスキャン動作によって得られる2つの像から, それぞれ走査方向に120nmの範囲で結晶格子を基準とした長さを算出した。図4に, 結晶像から得られた長さによる, 圧電素子のヒステリシス特性を示す。最も差が大きいところで, 230格子間隔に対して12格子程度の違いが生じている。基準結晶像を元に未知試料像の歪み補正を行う場合には, この非線形性が有効に補正されると考えられる。

4. 今後の課題

今後の課題として, 以下のようなことが挙げられる。

- (1) 走査方向だけではなくすべての方向に対して精度の高い比較測長を行うため, 今後はより正確なドリフト量の測定方法について検討するとともに, 走査方向へは熱ドリフトの影響が非常に小さいことを積極的に利用した像補正を行っていく。
- (2) 多くの場所, 方位において比較測長の精度評価を統計的に行うことで測定誤差を生じる各要因を把握し, その影響を補正することによって比較精度の向上をめざす。
- (3) より広いミクロンオーダーの範囲の走査を実現し, 実際に微細加工物などの寸法評価に応用する。
- (4) 格子点抽出の精度を向上させるため, 周囲の格子配列によって格子点のずれを補正する必要がある。また, 確実な格子点抽出を行うために, さらにS/N比の良い像

が得られるよう改善を行う。

5. 結 言

STMを用いて結晶表面を100nm以上にわたって観察し, 連続してとられた2つの結晶像について評価を行った。その結果, 広走査範囲の実現により結晶像からの格子の読み取り誤差の影響が相対的に減少し, 精度の高い比較が行えるようになった。走査方向と同じ方向について特徴点の並びの見かけの長さを比較した結果, 走査方向に関してはドリフトによる像の歪みの影響が非常に少なく, 見かけの長さの優れた一致を確認した。

走査方向と同じ方向については, DTU-STMによる2点同時観察においても熱ドリフトの影響の少ない高精度の比較測長が行えると期待できる。

結晶像からの格子点の抽出, および見かけの長さの算出を計算機によって自動化した。その結果, 重心計算によって得られる格子点の位置はノイズの影響を受け, その比較結果も目視による抽出の場合よりもばらつきが大きくなった。

6. 謝 辞

本STMの制作にあたりご協力をいただきました株式会社松下電工の児島肇氏, 北野斉氏, 株式会社ミットヨの山口靖之氏, 西沖暢久氏に感謝いたします。本研究の研究費の一部は選定研究費および, 科学研究費助成金によって賄われています。
(1994年4月15日受理)

参 考 文 献

- 1) G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber, E. Weibel, Phys. Rev. Lett. 49, 57 (1982).
- 2) H. Kawakatsu, T. Higuchi, J. Vac. Sci. Technol. A7, 319 (1990).
- 3) H. Kawakatsu, Y. Hosi, H. Kitano and T. Higuchi, J. Vac. Sci. Technol. B9, 651 (1991).
- 4) 川勝, 樋口, 川合, 渡辺, 西沖, 1992年度精密工学会秋季大会講演論文集。
- 5) 明田川, 高田, 弘津, 中山, 小林, 1992年度精密工学会春季大会講演論文集。
- 6) 羽根, 鳥井, 佐々木, 大熊, 1992年度精密工学会春季大会講演論文集。
- 7) E. C. Teague, J. Vac. Sci. Technol. B7(6), 1898 (1989).
- 8) Union Carbide, PYROLYTIC GRAPHITE MONOCHROMATOR, ZYH, serial #1017.